

DOI: 10.13607/j.cnki.gljt.2016.05.025

# 基于 DEMATEL/ISM 的高速公路路段 脆弱性影响因素研究

李静茹, 安实, 胡晓伟

(哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090)

**摘要:** DEMATEL/ISM 集成模型适用于高速公路路段脆弱性影响因素分析。分析时, 首先以是否直接影响多条路段为依据, 将高速公路路段脆弱性影响因素分为宏观和微观 2 个层面, 用专家打分法确定各因素对脆弱性的贡献度; 然后, 基于 DEMATEL/ISM 集成模型建立影响因素层次关系模型, 把复杂的路段脆弱性影响因素关系转换为良好的层次结构。研究发现: 恶劣气候和地质灾害是高速公路路段脆弱性的深层影响因素, 拓扑结构是直接影响因素。

**关键词:** 路段脆弱性; DEMATEL/ISM; 高速公路; 影响因素

文章编号: 1009-6477(2016)05-0109-05

中图分类号: U412.36+6

文献标识码: A

## DEMATEL/ISM Based Study on Influence Factors to Road Vulnerability of Highway

LI Jingru, AN Shi, HU Xiaowei

**Abstract:** DEMATEL/ISM assembled model is used to analyze the influence factors to road vulnerability of highway. In this paper, we divide the influence factors to road vulnerability of highway into macro and micro aspects based on whether it will affect multiple roads directly, then we use expert scoring method to determine contribution of all factors to vulnerability; Then we set up influence factors hierarchical relationship model based on DEMATEL/ISM assembled model, and convert complicated influence factors to road vulnerability to fine hierarchical structure. Study shows: Severe climate and geologic disaster are the main influence factors to road vulnerability of highway, and the topological structure is the direct influence factors.

**Keywords:** road vulnerability; DEMATEL/ISM; highway; influence factor

高速公路系统在现代生活中所起的作用越来越重要。然而, 在地质灾害、恶劣天气、道路施工或路段维修等情况下, 高速公路系统中的薄弱环节由于没有足够的力量去承受这些因素的影响, 容易发生交通拥堵或交通事故, 且导致其他相关路段相继拥堵和级联失效, 对整个高速公路系统产生极大的影响。例如, 2014 年 5 月 8 日—11 日, 中山市遭遇强降雨天气, 造成多个路段、路口积水较深, 发生交通事故 410 余宗, 并出现交通拥堵现象。2016 年 3 月 4 日开始, 黑龙江省局部出现较强降雪, 导致全省 6 条高速公路全线封

闭, 其他路线部分封闭。因此, 分析高速公路路段脆弱性影响因素有利于完善应急疏散体系, 提高投资效率。

本文在阐述高速公路路段脆弱性的基础上, 分析高速公路脆弱性影响因素, 并以是否直接影响多条路段为依据分为宏观因素和微观因素。此外, 基于 ISM 和 DEMATEL 的理论依据和研究思路, 建立高速公路路段脆弱性影响因素层次关系模型, 把复杂的路段脆弱性影响因素关系转换为良好的层次结构, 找出影响高速公路路段脆弱性的直接、中间和深层因素。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478151)

收稿日期: 2016-04-12

作者简介: 李静茹(1993-), 女, 山东省聊城市人, 硕士研究生。

## 1 高速公路路段脆弱性影响因素

### 1.1 高速公路路段脆弱性概念

交通事故、恶劣天气等内在或外在因素可能导致高速公路系统的某一子系统发生故障,致使与其相临近系统崩溃甚至整个系统功能失效<sup>[1]</sup>,这表明高速公路系统具有脆弱性。

高速公路系统  $S$  由若干个子系统  $S_i (i = 1, \dots, n)$  组成。假设子系统受到内部或外部因素扰动而崩溃时,其他子系统也随之崩溃,进而引起整个高速

公路系统崩溃。子系统  $S_i$  的状态用  $c_i \in C$  表示。若存在一个子系统  $S_j$ , 其状态变化到  $c_j \in F$  时,有  $\lim_{\delta} \delta(S) \rightarrow \infty$ , 则称系统  $S$  具有脆弱性,子系统  $S_j$  为脆弱源。式中  $F$  为子系统的崩溃域;  $c_j \in F$  表示子系统  $S_j$  崩溃;  $\delta_i(S)$  是整个系统  $S$  的一个性能指标。因此,寻找易于崩溃的路段并采取预防措施有利于保证高速公路系统的正常运行。

### 1.2 高速公路路段脆弱性影响因素分类

国内外对高速公路脆弱性影响因素的分类如表 1 所示。

表 1 高速公路路段脆弱性影响因素分类

年份	作者	类别	个数	数据来源	分析方法
2005	Husdal <sup>[2]</sup>	结构属性,自然属性,交通量属性	8	无	定性
2002	Srinivasank <sup>[3]</sup>	网络属性,威胁属性,流量属性,邻接属性	9	无	定性
2010	尹洪英 <sup>[4]</sup>	内部因素,外部因素	11	个人打分	ISM

由表 1 可知,不同学者根据不同研究角度将影响因素分为不同的类别。本文以是否直接影响多条路段为依据,把高速公路路段脆弱性影响因素分为宏观因素和微观因素 2 大类。宏观因素同时直接影响多条路段,产生区域性变化,在面层上影响路网脆弱性,包括网络拓扑结构  $a_1$ 、恶劣气候  $a_2$ 、地质灾害  $a_3$ 、应对措施  $a_4$ 。微观因素只能直接影响目标路段,对相邻路段的影响是通过级联失效完成的,包括路基路面质量  $a_5$ 、路段维修  $a_6$ 、蓄意破坏  $a_7$ 、交通事故  $a_8$ 。路段脆弱性是供给不满足需求的一种表现形式<sup>[5]</sup>。本文提到的 8 种因素会通过影响通行能力或交通流量间接改变供需关系,从而激发路段脆弱性,因此分析时本文不考虑通行能力和交通流量。高速公路路段脆弱性影响因素分类如图 1 所示。

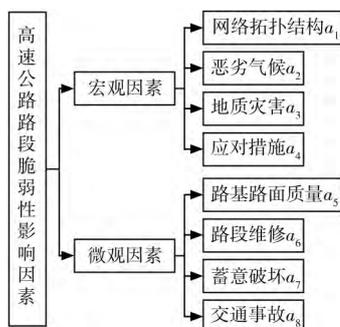


图 1 高速公路路段脆弱性影响因素

## 2 DEMATEL/ISM 集成模型构建

### 2.1 DEMATEL/ISM 集成模型的理论依据

DEMATEL 全称为决策试验和评价实验法,

1971 年由 Bottelle 研究所提出。其用于筛选复杂系统的主要要素,简化系统结构分析过程,充分利用专家经验和知识来处理复杂的社会问题,尤其是对那些要素关系不确定的系统更为有效。ISM 全称为解释结构模型,1973 年由美国 J·华费尔特教授提出。其是现代系统工程中广泛应用的一种分析方法,是结构模型化技术的一种。该技术的应用是在计算机辅助下,结合人们的实践将复杂的系统划分为若干子系统,构成多级递阶的结构模型,将抽象的观点转变为结构清晰的直观模型,并对难以定量评价的方案进行排序。2 种方法都是对复杂系统进行分析和决策的重要方法,均得到了广泛应用,如用于高速公路作业区交通安全影响因素分析<sup>[6]</sup>、水上交通系统脆弱性影响因素分析<sup>[7]</sup>等。DEMATEL 模型中反映不同因素间相互影响关系及程度的是综合影响矩阵  $T$ ,但其未考虑因素对自身的影响,而因素对自身的影响可以用单位矩阵  $I$  表示,因此整体影响矩阵  $H = T + I$  能反映因素对自身及其他元素的影响。DEMATEL 模型的元素取值范围为  $[0, 1]$ ,其代表影响的重要程度  $\rho$  表示无影响,1 表示有影响,且值越大则表示影响越强烈。ISM 法反映因素间相互影响关系的是可达矩阵  $M$ ,其考虑了因素对自身的影响,元素取值范围为  $\{0, 1\}$ ,其代表影响的重要程度  $\rho$  表示无影响,1 表示有影响,只有 2 种取值。

由上述分析可知,DEMATEL 模型得到的整体影响矩阵  $H$  和 ISM 法得到的可达矩阵  $M$  存在共性:两者的零元素表示因素间没有影响,非零元素表示

因素间存在影响关系。不同的是,整体影响矩阵  $H$  蕴含的信息量要大于可达矩阵  $M$ ,整体影响矩阵  $H$  不仅能反映影响关系的有无,还能反映因素间的影响程度;而可达矩阵  $M$  仅能反映影响关系的存在与否。所以,整体影响矩阵  $H$  和  $M$  可达矩阵间存在着单映射,根据 DEMATEL 模型得到的矩阵  $H$  可以得到可达矩阵  $M$ <sup>[8]</sup>。

### 2.2 DEMATEL/ISM 集成模型的研究思路

DEMATEL/ISM 集成模型的思路如图 2 所示。本文首先根据 DEMATEL 模型推导系统影响因素间综合影响矩阵,以此计算整体影响矩阵;然后根据整体影响矩阵和可达矩阵的映射关系计算可达矩阵;最后依据 ISM 法划分出影响因素的层次结构。

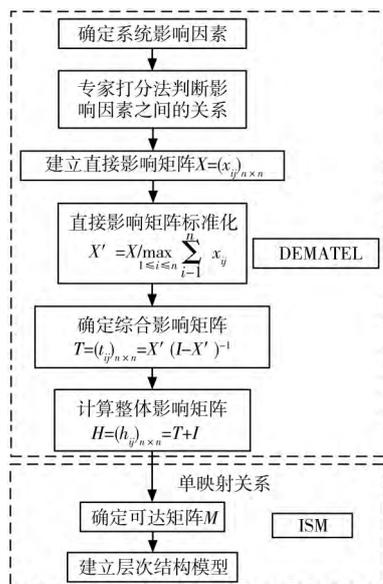


图 2 DEMATEL/ISM 集成模型的研究思路

图 2 中  $x_{ij}$  表示因素  $a_i$  对因素  $a_j$  的直接影响程度;  $x'_{ij}$  表示因素  $a_i$  对因素  $a_j$  的间接影响程度;  $t_{ij}$  表示因素  $a_i$  对因素  $a_j$  的综合影响程度;  $h_{ij}$  表示因素  $a_i$  对因素  $a_j$  的整体影响程度;  $n$  表示影响因素个数;  $i$  和  $j$  分别表示影响因素所在的行数和列数。

### 2.3 DEMATEL/ISM 集成模型的算法步骤

DEMATEL/ISM 集成模型的算法步骤如下。

步骤 1: 确定系统脆弱性的影响因素及不同因素之间的影响程度,得到直接影响矩阵  $X = (x_{ij})_{n \times n}$  此时不考虑因素对自身的影响,所以  $x_{ij} = 0 (i = j)$ 。

步骤 2: 直接影响矩阵标准化得到间接影响矩阵  $X'$ 。

$$X' = (x'_{ij}) = X / \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (1)$$

式中:  $x'_{ij} \in [0, 1]$  且  $\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n x'_{ij} = 1$ 。

步骤 3: 计算综合影响矩阵  $T$ 。

$$T = (t_{ij})_{n \times n} = X'(I - X')^{-1} \quad (2)$$

式中:  $t_{ij} \in [0, 1]$  且  $I = (i)_{n \times n}$  为单位矩阵。

步骤 4: 计算各因素的影响度  $R_i$  和被影响度  $C_i$  以及中心度  $Z_i$  和原因度  $Y_i$ 。利用笛卡尔坐标系绘制原因 - 结果图,中心度  $Z_i$  越大说明因素越重要,原因度  $Y_i < 0$  说明因素为结果因素,原因度  $Y_i > 0$  说明因素为原因因素。原因度的绝对值  $|Y_i|$  和中心度  $Z_i$  的值小于一定值,说明该因素不重要,可以考虑去除该因素。

$$R_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$C_i = \sum_{j=1}^n t_{ji} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$Z_i = R_i + C_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$Y_i = R_i - C_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

步骤 5: 综合影响矩阵与单位矩阵相加得到整体影响矩阵,此时考虑了因素对自身的影响,所以  $h_{ij} = 1 (i = j)$ 。

$$H = (h_{ij})_{n \times n} = T + I \quad (7)$$

步骤 6: 根据整体影响矩阵  $H$  确定可达矩阵  $M$ ,根据实际情况确定阈值  $\lambda$ 。当  $h_{ij} \geq \lambda$  时,取  $m_{ij} = 1$ ; 当  $h_{ij} < \lambda$  时,取  $m_{ij} = 0$ 。

步骤 7: 根据可达矩阵找出各个元素相对应的可达集  $P$ 、先行集  $Q$ 。可达集  $P$  为每一行中元素为 1 对应的列,先行集  $Q$  为每一列中元素为 1 对应的行。

步骤 8: 验证式  $P_i = P_i \cap Q$  是否成立,其中  $i = 1, \dots, n$ 。若成立,则说明对应的因素  $a_i$  为底层因素,并在可达矩阵  $M$  中划除  $i$  行和  $i$  列。

步骤 9: 重复步骤 7 和步骤 8,直到所有因素均被划除。

步骤 10: 按照因素被划除的顺序,确定因素的层次结构。

## 3 算例应用

### 3.1 高速公路路段脆弱性影响因素 DEMATEL/ISM 集成模型构建

本文采用专家打分法确定各影响因素之间的关系。语言判断数值转换如表 2 所示。

表2 语言与数值转换

语言判断关系	数值转换
因素 $a_i$ 对因素 $a_j$	没有影响记为 0
	较低影响记为 1
	低影响记为 2
	较高影响记为 3
	高影响记为 4

根据收集的专家打分结果确定直接影响矩阵, 本文的直接影响矩阵如表3所示。在此基础上计算综合影响矩阵, 并通过 DEMATEL 法求解各因素的影响度、被影响度、中心度和原因度, 求解结果如表5所示。取阈值  $\lambda = 0.2$  根据单映射关系  $M$  确定可达矩阵, 如表4所示。

表3 直接影响矩阵

影响因素代号	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$
$a_1$	0	0	0	1	0	0	3	0
$a_2$	2	0	1	4	2	3	1	3
$a_3$	4	0	0	4	4	3	0	3
$a_4$	4	0	0	0	0	0	0	1
$a_5$	0	0	0	1	0	4	0	1
$a_6$	3	0	0	1	2	0	0	3
$a_7$	4	0	0	2	2	1	0	1
$a_8$	2	0	0	4	1	0	0	0

表4 可达矩阵

影响因素代号	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$
$a_1$	1	0	0	0	0	0	0	0
$a_2$	1	1	0	1	0	1	0	1
$a_3$	1	0	1	1	1	1	0	1
$a_4$	1	0	0	1	0	0	0	0
$a_5$	0	0	0	0	1	1	0	0
$a_6$	1	0	0	0	0	1	0	0
$a_7$	1	0	0	0	0	0	1	0
$a_8$	0	0	0	1	0	0	0	1

高速公路路段脆弱性影响因素具有多级递阶结构的特点。如图3所示, DEMATEL/ISM 集成模型分为3个层次: 第1层次  $L_1$  包含网络拓扑结构  $a_1$  和应对措施  $a_4$ ; 第2层次  $L_2$  包含路基路面质量  $a_5$ 、

表5 DEMATEL 法求解结果

影响因素	$R_i$	$C_i$	$R_i + C_i$	$R_i - C_i$
$a_1$	0.380 1	1.743 2	2.123 3	-1.363 2
$a_2$	1.423 0	0.000 0	1.423 0	1.423 0
$a_3$	1.508 3	0.055 6	1.563 9	1.452 8
$a_4$	0.392 7	1.417 9	1.810 6	-1.025 1
$a_5$	0.549 6	0.826 7	1.376 3	-0.277 1
$a_6$	0.737 7	0.832 6	1.570 3	-0.094 9
$a_7$	0.816 2	0.512 8	1.329 0	0.303 4
$a_8$	0.548 9	0.967 9	1.516 8	-0.419 0

路段维修、 $a_6$  蓄意破坏  $a_7$ 、交通事故  $a_8$ ; 第3层次  $L_3$  包含恶劣气候  $a_2$  和  $a_3$  地质灾害。

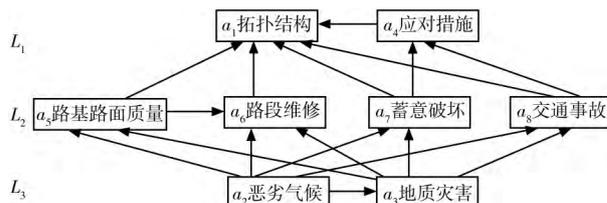


图3 路段脆弱性影响因素的 DEMATEL/ISM 集成模型

### 3.2 DEMATEL/ISM 集成模型结果分析

DEMATEL/ISM 集成模型有利于把高速公路路段脆弱性影响因素之间的复杂关系层次化和直观化, 模型结果分析如下:

1) 高速公路路段脆弱性的直接影响因素是拓扑结构, 其他7个因素通过影响拓扑结构间接影响高速公路路段脆弱性。合理的网络设计能显著抵抗其他因素对路网的影响, 使道路网络的脆弱性不易被激发。因此, 加大道路网络的规划设计对降低路段脆弱性至关重要。

2) 中间影响因素是应对措施、路段维修、蓄意破坏、交通事故、路基路面质量, 这些因素能够影响道路网络拓扑结构和应对措施, 进而影响路段脆弱性。

3) 深层影响因素是恶劣气候和地质灾害, 这2个因素几乎不受其他几个因素的影响, 但却对其他因素有影响, 最终影响路段脆弱性。恶劣气候和地质灾害发生后, 道路、交通条件变化很大, 因此要对这2种因素予以高度重视, 提前制定针对各种恶劣气候和地质灾害的应急方案, 尽可能降低不良情况下的路段脆弱性。

### 4 结束语

当前对高速公路路段脆弱性影响因素的分析较

少,且研究方法以定性分析为主。本文探讨了影响高速公路路段脆弱性的8个相关因素以及各因素之间的相互联系,构建了高速公路路段脆弱性影响因素的DEMATEL/ISM集成模型,将其复杂的因素关系直观、清晰地展现出来。研究发现,高速公路系统最直接的影响因素是网络拓扑结构,合理的网络设计是降低路段脆弱性的关键措施。

影响路段脆弱性的因素繁多,专家打分法获得的数据带有较大的主观性,采用不同的数据会获得不同的模型结果。因此,研究影响因素之间的关系需要定量数据的支撑,以便明确因素间的耦合机理,这是未来需要关注的一个方面。

#### 参考文献

- [1] 韦琦,金鸿章,姚绪梁,等.基于脆性的复杂系统崩溃的初探[J].哈尔滨工程大学学报,2003,24(2):161-165.
- [2] HUSDAL J. The vulnerability of road networks in a cost

- benefit perspective [C]. Washington, D. C.: Proceedings of the Transportation Research Board Annual Meeting (TRB 2005) 2005:9-13.

- [3] SRINIVASANK. Transportation Network Vulnerability Assessment: A Quantative Framework [J]. Transportation Security, 2002 23(12):60-79.
- [4] 尹洪英. 道路交通网络脆弱性评估模型研究[D]. 上海:上海交通大学,2011.
- [5] CHEN B Y, LAM W H K, SUMALEE A et al. Vulnerability analysis for large-scale and congested road networks with demand uncertainty [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice 2012 46(3):501-516.
- [6] 吴彪,许洪国,戴彤焱.基于DEMATEL-ISM的高速公路作业区交通安全影响因素辨识[J].交通运输系统工程与信息,2010,10(5):130-136.
- [7] 陆梦.基于DEMATEL与ISM集成方法的水上交通系统脆性影响因素研究[J].上海海事大学学报,2014,35(1):18-22.
- [8] 周德群,章玲.集成DEMATEL/ISM的复杂系统层次划分研究[J].管理科学学报,2008,11(2):20-26.

(上接第108页)

通量的日益增加以及技术的日新月异,进行隧道通风、照明系统设计时,应灵活应用规范,并对各项新技术予以研究和关注,以便能更好地总结经验,完善隧道机电系统技术体系,促进公路隧道设计向“合理化”“节能化”目标发展。

#### 参考文献

- [1] 交通部公路司,中国工程建设标准化协会公路工程委员会.公路工程技术标准:JTG B01-2003[S].北京:人民交通出版社,2003.
- [2] 重庆交通科研设计院.公路隧道通风照明设计规范:JTJ 026.1-1999[S].北京:人民交通出版社,1999.
- [3] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路隧道设计规范:JTG D70/2-2014[S].北京:人民交通出版社,2014.

- [4] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路隧道照明设计细则:JTG/T D70/2-01-2014[S].北京:人民交通出版社,2014.
- [5] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路隧道通风设计细则:JTG/T D70/2-02-2014[S].北京:人民交通出版社,2014.
- [6] 陈仲林,李毅,杨春宇,等.道路照明中的光生物效应研究[J].照明工程学报,2007,18(3):1-5.
- [7] 杨超,王志伟.公路隧道通风技术现状及发展趋势[J].地下空间与工程学报,2011,7(4):819-824.
- [8] 吕康成,伍毅敏.特长公路隧道通风设计若干问题与对策[J].现代隧道技术,2006,43(6):35-39.
- [9] 夏永旭,石平.公路隧道通风空气交叉污染三维数值分析[J].长安大学学报(自然科学版),2006,26(6):44-47.